

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-218627

(43)Date of publication of application : 10.08.1999

(51)Int.Cl.

G02B 6/122

(21)Application number : 10-021139

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP  
<NTT>

(22)Date of filing : 02.02.1998

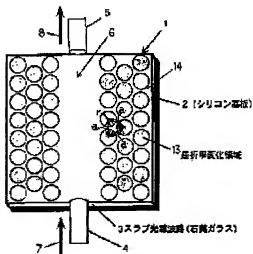
(72)Inventor : TACHIKAWA YOSHIKI  
KOBAYASHI JUNYA

## (54) PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDE AND ITS MANUFACTURE

### (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To stabilize characteristics of the photonic crystal waveguide and to reduce the manufacturing cost.

**SOLUTION:** The photonic crystal waveguide is provided with a photonic crystal 14 structure which has a slab optical waveguide 3 on the top surface of a substrate 2 and also has refractive index variation areas 13 with a different refractive index from that of the core layer of the slab optical waveguide 3 arranged in a lattice array shape at part of the slab optical waveguide 3. In this case, the refractive index variation areas 13 are formed of the same material as the material constituting the core layer of the slab optical waveguide 3. The refractive index variation areas 13 are arranged in the lattice array shape on both the sides of an optical waveguide area 6 where light is propagated. The refractive index of the core layers of the refractive index variation areas 13 is larger than that of the core layer of an area off the refractive index variation areas 13 and the relative index difference is about 10<sup>-4</sup> to 10<sup>-2</sup>. A unit lattice is in regular triangle array.



### LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 18.01.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 15.07.2003

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

(10)日本国特許庁(J P)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-218627

(43)公開日 平成11年(1999) 8月10日

(51)Int. Cl.<sup>4</sup>

G 0 2 B 6/122

識別記号

P I

G 0 2 B 6/12

C

A

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 12 頁)

(21)出願番号 特開平10-21139

(22)出願日 平成10年(1998) 2月2日

(71)出願人 000002266

日本電信電話株式会社

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号

(72)発明者 立川 吉明

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本

電信電話株式会社内

(72)発明者 小林 潤吉

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本

電信電話株式会社内

(74)代理人 弁理士 森田 敬喜

(54)【発明の名称】 フォトニック結晶光導波路およびその製造方法

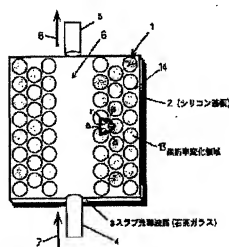
(57)【要約】

【課題】 フォトニック結晶光導波路の特性の安定化、製造コストを削減。

【解決手段】 基板の表面にスラブ光導波路を有するとともに前記スラブ光導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列状に配置されたフォトニック結晶構造が設けられたフォトニック結晶光導波路であって、前記屈折率変化領域は前記スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質のもので構成されている。先が直線する光導波路の両側にそれぞれ屈折率変化領域が格子配列状に配置されている。前記屈折率変化領域のコア層の屈折率は屈折率変化領域から外れた領域のコア層の屈折率よりも大きく、その屈折率差は $1.0 \times 10^{-4}$  ~  $1.0 \times 10^{-2}$ 程度であること

を特徴とする。単位格子は正三角形配列になっている。

図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 基板の表面に誘電体スラブ光導波路を有するとともに前記スラブ光導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列状に配置されたフォトニック結晶構造が設けられたフォトニック結晶導波路であって、前記屈折率変化領域は前記スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光導波路効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 2】 コア層を下部クラッド層と上部クラッド層で挟みつついずれの層も有視厚膜で形成されるスラブ光導波路であって、前記スラブ光導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列状に配置されるとともに、前記屈折率変化領域は前記スラブ光導波路のコア層の屈折率変化処理によって形成されていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 3】 光が伝播する光導波路の両側にそれぞれ屈折率変化領域が格子配列状に配置されていることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 4】 前記スラブ光導波路の一端側に沿って前記屈折率変化領域が格子配列状に配置されていることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 5】 前記スラブ光導波路の一端側に設けられた格子配列状の屈折率変化領域に平行にまたは垂直もしくは斜めに光が伝播する光導波路領域が設けられていることを特徴とする請求項 4 に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 6】 前記屈折率変化領域による格子列は格子ピッチが異なる複数の格子列になっていることを特徴とする請求項 1乃至請求項 5 のいずれか 1 項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 7】 前記格子列の単位格子は正六角形配列になっていることを特徴とする請求項 1乃至請求項 6 のいずれか 1 項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 8】 前記屈折率変化領域のコア層の屈折率変化領域は屈折率変化領域から外れた領域のコア層の屈折率よりも大きく、その屈折率変化は  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  程度であることを特徴とする請求項 1乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 9】 前記スラブ光導波路はラウス光導波路または有視光導波路で構成されていることを特徴とする請求項 1 または請求項 2乃至請求項 8 のいずれか 1 項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項 10】 前記請求項 1乃至請求項 9 のフォトニック結晶導波路の製造方法であって、前記基板の上に下部クラッド層、コア層、上部クラッド層からなるスラブ光

導波路を制作した後、電子線、SOL光、紫外光および近紫外線のうちのいずれかを前記上部クラッド層を通して前記コア層に選択的に照射して光導波路効果による屈折率変化を生じさせて前記屈折率変化領域を制作することを特徴とするフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項 11】 前記請求項 10 の製造方法において、前記基板から下部クラッド層およびコア層ならびに上部クラッド層からなる有視光導波路を剥離させて前記請求項 2 に記載のフォトニック結晶導波路を製造することを特徴とするフォトニック結晶導波路の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明はフォトニック結晶導波路およびその製造方法に関し、たとえば、光通信システムや光交換システムあるいは光計測システムの分野において、光遅延を透過（伝播光の遅延透過）あるいは阻止（伝播光の遅延制御）する光フィルタ、光信号分離器、光信号検出デバイス等に適用して有効な技術に関する。

【0002】

【従来の技術】 光通信システム等に使用される光フィルタの一つとして、フォトニック結晶導波路が知られている。

【0003】 フォトニック結晶導波路については、J. O. Joannopoulos 他著 "Photon in Crystal" (Princeton University Press, 1995, pp.94-104) に記載されている。

【0004】 図 10 および図 11 は従来のフォトニック結晶導波路を示す図である。フォトニック結晶導波路 1 は、基板 2 と、この基板 2 の表面に設けられたスラブ光導波路 3 とからなるとともに、前記スラブ光導波路 3 の光が伝播する光導波路領域 6 の両側に格子配列状に複数の空気ホール 9 が設けられた構造になっている。この空気ホール 9 の前記スラブ光導波路 3 のコア層に対応する部分の屈折率は、基板 2 に異なり、屈折率変化領域 13 を構成することになる。

【0005】 スラブ光導波路 3 は、下部クラッド層 10、コア層 11、上部クラッド層 12 からなり、前記空気ホール 9 は上部の上部クラッド層 12 から下部の下部クラッド層 10 にまで延在し、円柱空間を形成している。この空気ホール 9 内には基板 2 が入り込み、屈折率がスラブ光導波路 3 のコア層 11 とは異なるようになっている。

【0006】 また、空気ホール 9 の格子配列はブラッグ (Bragg) 条件を満たし、所定の波長の光のみを反射させ伝播させるフォトニック結晶を構成する。

【0007】 フォトニック結晶導波路 1 の光導波路領域 6 の一端側に入力光ファイバ 14 を接続し、他端側に出力光ファイバ 15 を接続した場合、入力光ファイバ 14 から光導波路領域 6 に入力された入力光 7 は、前記ブラッグ条件を満たす波長の光のみが出力光 8 となって出力光ファイバ

ちから取り出される。

【00009】前記真空ホール9は、図12に示すように、基板2上にスラブ光導波路3を形成した後、たとえば、電子ビーム（E<sub>B</sub>: Electron Beam）リソグラフィと反応性イオンエッチング（RIE）によって形成される。真空ホール9の直径は0.1〜0.24μm、深さは0.5〜0.8μm、ピッチは0.16〜0.36μmである。なお、真空ホール9の上端は解放されている。

【00099】

【発明が解決しようとする課題】従来のフォトニック結晶導波路の製造においては、基板2の表面にスラブ光導波路3を作製する場合、以下の方法で作製している。【0010】（1）炭組成長（MO-CVD）法あるいは炭組成長（LPE）法などによって、スラブ光導波路3を構成する下部クラッド層10、コア層11、上部クラッド層12となる層を順次作製する。

【0011】（2）石英ガラスなどからスラブ光導波路3を作製する際は、基板2上に作製したガラスを電気炉で焼結して透明化して作製する。

【0012】これらの方法において、基板2の温度は、前記MO-CVD法やLPE法では500〜700℃で程度になり、前記電気炉による焼結では約1300℃となり高温になる。

【0013】このような高温プロセスは制御が難しい。

【0014】一方、真空ホール9の作製は反応性イオンエッチング（RIE）によって行うが、真空ホール9の直径がサブミクロンと小さいので円柱状にうまく加工するのが難しい。たとえば、真空ホール9の直径が上部と底部で違ってしまう、所定のブラッグ条件を満たすように再現性良く真空ホール9を作製することは難しい。

【0015】さらに、複製作製加工、穴加工と加工工程が全くフォトニック結晶導波路の作製コストの増加が妨げられる。

【0016】以上のように、従来の製造方法によれば、プロセス制御が難しく、その結果再現性よく安定にフォトニック結晶導波路を実現することは容易でなかった。

【0017】本発明の目的は、伝播長の逆長透過・逆長利得特性が良好なフォトニック結晶導波路およびその製造方法を提供することにある。

【0018】本発明の他の目的は、伝播長の逆長透過・逆長利得特性が良好なフォトニック結晶導波路を再現性よくかつ安価に製造する方法を提供することにある。

【0019】本発明の前記ならびにその他の目的と新規な特徴は、本明細書の記述及び附图図によって明らかにする。

【0020】

【課題を解決するための手段】本明細書に開示される発明のうち代表的なものの概要を簡単に説明すれば、下記の通りである。

【0021】（1）基板の表面にスラブ光導波路を有するとともに前記スラブ光導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列（アレイ）状に配置されたフォトニック結晶構造が設けられたフォトニック結晶導波路であって、前記屈折率変化領域は前記スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光路差効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されている。光が伝播する光導波路の両側にそれぞれ屈折率変化領域が格子配列状に配置されている。前記格子列の単位格子は正多角形配列、たとえば三角配列になっている。前記屈折率変化領域のコア層の屈折率は屈折率変化領域から外れた領域のコア層の屈折率よりも大きく、その屈折率差は10<sup>-4</sup>〜10<sup>-2</sup>程度である。前記スラブ光導波路はガラス光導波路または有機光導波路で構成されている。

【0022】このようなフォトニック結晶導波路は、以下の方法で製造される。

【0023】基板上に下部クラッド層、コア層、上部クラッド層からなるスラブ光導波路を作製した後、電子線、SOR（Synchrotron orbital radiation）光、紫外線および遠赤外線などのいずれかを前記上部クラッド層を通して前記コア層に選択的に照射して光路差効果による屈折率変化を生じさせて前記屈折率変化領域を作製する。

【0024】（2）前記手段（1）の構成のフォトニック結晶導波路であり、このフォトニック結晶導波路はコア層を下部クラッド層と上部クラッド層で挟みこみつつその層を有機薄膜で形成されるスラブ光導波路構成である。

【0025】このようなフォトニック結晶導波路は、前記手段（1）の製造方法において、基板の表面に有機光導波路からなるスラブ光導波路を形成してフォトニック結晶導波路とした後、前記基板から有機光導波路を剥離させることによって製造する。

【0026】（3）前記手段（1）または手段（2）の構成において、前記スラブ光導波路の一端側に沿って前記屈折率変化領域が格子配列状に配置されている。前記スラブ光導波路の一端側に設けられた格子配列状の屈折率変化領域に平行にまたは垂直もしくは斜めに光が伝播する光導波路が設けられている。

【0027】（4）前記手段（1）乃至手段（3）の構成において、前記屈折率変化領域による格子列は格子ピッチが異なる複数の格子列になっている。

【0028】前記（1）の手段によれば、（a）フォトニック結晶導波路の屈折率変化領域は、スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光路差効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されている。

このため、屈折率変化領域の深さ・幅の容許の大きさは一定し、従来の真空ホールの場合のように上下で大きさが変化しないため、ブラッグ条件をよく満たすようにな

り、伝播長の波長制御あるいは波長透過が高精度に行えるようになる。したがって、たとえば、高精度な波長・分波手段として採用することができる。

【0029】(b) 屈折率変化領域は正三角形格子配列となり、充分なるブラッグ条件を満たすため、高精度な波長光の波長制御または波長透過を保證する。

【0030】(c) フォトリソグラフィによる屈折率変化領域において、アレイ状に配置した屈折率変化領域は、電子線、SOD光、紫外線および近赤外線などのうちのいずれかを、スラブ光波導路の上部クラッド層を通してコア層に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて作製することから、高精度度までかつ深さ方向の各層の寸法が均一な屈折率変化領域を製造することができる。

【0031】(d) フォトリソグラフィによる屈折率変化領域において、アレイ状に配置した屈折率変化領域は、電子線、SOD光、紫外線および近赤外線などのうちのいずれかを、スラブ光波導路の上部クラッド層を通してコア層に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて作製し、従来のようなエッチング等の機械的加工を省く必要としないため作製が極めて容易で製造コストの低減が図れる。

【0032】(e) ガラス光波導路によるフォトニック結晶を作る際、特別な加工技術を要しないため大幅な低価格化、高信頼化、量産化を図ることができる。

【0033】(f) スラブ光波導路を有機光波導路で構成する場合、有機光波導路は恒温度プロセスになるため光波導路の作製が容易になり、製造コストの低減が図れる。

【0034】前記(2)の手段によれば、有機スラブ光波導路を基板から刻がした構造となることから、フォトニック結晶波導路の光波導するコア層の保護無損化が達成できる。

【0035】前記(3)の手段によれば、スラブ光波導路の一端側に沿って前記屈折率変化領域が格子配列状に配置されているとともに、前記屈折率変化領域による格子列(アレイ)に対して平行に光は伝播もしくは斜めに光が伝播する光波導路が設定されていることから、光波導路設計の自由度が高くなる。すなわち、前記格子列に垂直に光を導入されれば、出力光は格子列で折り返して出射される。また、格子列に対して斜めに光を導入されれば、出力光は格子列で反射して所定の角度を有して出射される。したがって、角度を調べ、光の伝播方向を直前に曲げることもできる。また、これらの光伝播方向の曲げの場合、その曲げ損失も小さくなる。

【0036】前記(4)の手段によれば、格子列を格子ピッチが異なる複数の格子列で構成しておくことによってチャープ特性の実現が可能になる。

【0037】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実

施形態を詳細に説明する。なお、実施形態を説明するための全図において、同一機能を示すものは同一符号を付け、その繰り返しの説明は省略する。

【0038】(実施形態1) 図1乃至図4は本発明の実施形態(実施形態1)であるフォトニック結晶波導路およびその製造方法に係る図である。

【0039】本実施形態1のフォトニック結晶波導路1は、図1および図2に示すように、シリコンからなる基板(シリコン基板)2上に、スラブ光波導路としてガラス光波導路を形成した構造になっている。

【0040】スラブ光波導路3は、図2に示すように、シリコン基板2上に順次形成された下層クラッド層10、コア層11、上層クラッド層12によって構成されるが、これらの層はいずれもSiO<sub>2</sub>膜(石英ガラス、フッ化物がガラス等のガラス)で形成されている。

【0041】コア層11は屈折率を大きくするため、たとえばGeO<sub>2</sub>を添加してある。

【0042】また、屈折率差を大きくするため、上層クラッド層12を形成時に、水素(H<sub>2</sub>)加圧を行う。

【0043】スラブ光波導路3を構成する各層の厚さは、たとえば、以下の通りである。下層クラッド層10および上層クラッド層12の厚さは約15μm、コア層の厚さは約0.3μmである。また、コアとクラッドの比屈折率差は0.3〜1%程度である。

【0044】図2に示すように、中央部に沿う所定幅の領域が光波導路領域6となり、この光波導路領域6の両側に沿って格子配列(アレイ)状に屈折率変化領域13が設けられている。前記光波導路領域6の幅は光ファイバの断面積を考えると数μm<sup>2</sup>〜数十μm<sup>2</sup>が好ましい。

【0045】図2では屈折率変化領域13はそれぞれ9列設けられ、隣り合う列との間で正三角形格子(triangular lattice)からなる単位格子を構成している。したがって、2列配列により単位格子は形成されるが、9列にしてあることから屈折率変化領域13の間隔からの光の漏れが防げ、光の閉じ込め効果が高くなる。さらに格子パターンによっては、光の閉じ込め効果を高めるためにより多くの列による配列を必要とする場合がある。

【0046】前記正三角形格子のピッチは、たとえば0.5μm、屈折率変化領域13の直径は0.45μmである。

【0047】前記屈折率変化領域13のコア層の屈折率は、屈折率変化領域13から与えられるコア層の屈折率よりも大きくなり、たとえば比屈折率は10<sup>-4</sup>程度になる。

【0048】これら屈折率変化領域13をスラブ光波導路3上に格子配列した結晶は、フォトニック結晶(2次元フォトニック結晶)14と呼称されている。

【0049】フォトニック結晶14は、基板からの高出力のためにはエキシマレーザーで発生する紫外(UV)光あるいは近赤外光を、スラブ光波導路3の末端に選択

的に照射して光誘起効果による屈折率変化をスラブ光導波路のコア層内に生じさせることによって形成される。

【0050】このとき、半径 $r$ の円柱状に屈折率が変化した微小屈折率変化領域13を規則正しく整列させる。たとえば正三角形格子を構成させる。

【0051】結晶は原子あるいは分子の周期的な配列であり、結晶格子は原子あるいは分子の小さな定常的な構造が空間的に繰り返されていることに生じる。したがって、結晶は周期的なポテンシャルをその中を伝播する電子に与え、結晶構造は導電性を支配する。特に、格子は結晶のエネルギーバンド構造にギャップを挿入することができるので、原子からのブラッグ回折図形により一定のエネルギーをもった電子は一定の方向に伝播することを禁止される。

【0052】その光学的なアナロジーがフォトニック結晶であり、その周期的なポテンシャルは原子の代わりに巨視的な光半導体材料あるいは誘電体材料の格子により与えられる。したがって、フォトニック結晶においては、格子構造および格子定数で決定されるバンドギャップとならばブラッグ回折図形による反射波長域が存在することになる。

【0053】また、屈折率の大きさは石英ガラスで1.46、伝播する光の波長が1μmで1.5である。屈折率変化は大きいほどよいが、これらの材料で実現できる現実的な屈折率増加量は $10^{-4}$ から $10^{-2}$ の範囲である。

【0054】フォトニック結晶では、一般に円柱状構造とそうでない構造との屈折率差が大きいことが望ましいが、従来技術では比屈折率差が0.7と1桁以上大きい分だけ同じ反射率を得るのに格子数を多くなくて済む利点がある。

【0055】しかし、その反面、格子のピッチ、内径が小さくなり加工が難しくなるという欠点がある。

【0056】一方、本発明のように屈折率差が0.01と小さい場合は加工が容易となり、格子数を増やせば原理的に同様の効果を得ることができる。

【0057】この様子をもう少し詳しく数学的に説明する。簡単のため、格子が直線構造に沿って等間隔に並んだ1次元のブラッグ光導波路格子を例にとると、ブラッグ波長 $\lambda_B$ における光電力反射率は $R = 1 - \exp(-\alpha)$ （ $\alpha$ ）である。モード結合係数 $\alpha$ と格子の長さ $L$ との積によって決まる。

【0058】このように、屈折率変化によって格子を形成する場合、一般に結合係数が小さいので、高反射率を得るには格子部の長さ $L$ を大きくして格子をたくさん配置することが必要となることがわかる。

【0059】他方、前記フォトニック結晶導波路1の光導波路領域6の一側面には入力ファイバ4が接続され、他端側には出力ファイバ5が接続されている。前記入

力ファイバ4および出力ファイバ5は、単一モードファイバまたは分岐シフトファイバもしくは保導保持ファイバ等で構成されている。たとえば、この実施形態では単一モードファイバが使用されている。

【0060】図1はフォトニック結晶導波路1の使用形態を模式的に示すものであるが、実際の製品としては、パッケージ（パッケージ）内にフォトニック結晶導波路1が設置され、容易に設けられた光ファイバガイド等によってそれぞれ入力ファイバ4や出力ファイバ5が光ケーブルの状態で支持される構成になる。また、フォトニック結晶導波路1は、OEICを構成するシリコン基板やガラス基板さらには化合物半導体基板の一部に形成される構造もある。

【0061】このようなフォトニック結晶導波路1では、入力ファイバ4からの光（入力光7）が、結晶格子が存在しない光導波路領域6の一側面に入力されると、前記入力光7はスラブ空間に広がって行くとき、屈折率変化領域13が存在するフォトニック結晶で反射あるいは透過される。その際、いわゆるブラッグ条件を満たす波長の光のみが結晶で反射され、それ以外の波長の光は結晶を透過する。このとき、反射光は光学的な多光束干渉を生じる。その結果、ブラッグ条件を満たす波長の光はスラブ光導波路3の格子が無い部分に閉じ込められて光導波路領域6を伝播していくことが許される。

【0062】この多光束干渉は透過波長を制御する効果がある。この伝播光は、格子のピッチ $a$ が波長の整数倍のとき強められ、 $(1 + 1/2)$  波長の整数倍のとき弱められる。このような構成になっているため、従来技術に比べて容易に波長特性を有する光フィルタを実現することが可能である。

【0063】つぎに、このようなフォトニック結晶導波路1の製造方法について説明する。図9に示すように、シリコン基板2上に、光線加水分解法やイオン交換法により石英（SiO<sub>2</sub>）ガラスで下層クラッド層10、コア層11、上層クラッド層12を形成して2次元方向に光の閉じ込めのない、いわゆるスラブ構造のガラス光導波路8a（スラブ光導波路3）を制作する。なお、基板2は石英ガラス基板や他のガラス基板でもよい。

【0064】前記コア層11には屈折率を増大させるためにガリウム（Ga）やリン（P）等の不純物をコア形成過程において予め添加しておく。本実施形態1では、たとえばGaを添加する。また、ガラス光導波路8aを形成した後には水素（H<sub>2</sub>）加圧処理を施してもよい。

【0065】前記下層クラッド層10の厚さは約15μm、コア層11の厚さは約5μm、上層クラッド層12の厚さは約15μmである。また、コアとクラッドとの屈折率差は0.3〜1%程度である。

【0066】つぎに、光導波路240nmのK<sub>1</sub>-モードエッジレーザ、193nmのA<sub>1</sub>-モードエッジレーザ、あるいは

YAGレーザ（第2あるいは第4高調波利用）などで発生する紫外光（紫外光）を、図4に示すように、ガラス製位相マスク21を介してスラブ光導波路3表面の上方から屈折率変化領域13を形成する部分に照射する。

【0057】照射物は、電子線、SOF光、紫外線、近赤外線等のいずれでもよい。

【0058】ここで使用する2次元ガラス製位相マスク21は、1/2波長（位相に $\pi$ ）の厚さの円形もしくは方形の穴22が、たとえばフォトリソグラフィと反応性イオンエッチング等で石英ガラス板23の2次元方向に形成配列されたものである。このガラス製位相マスク21の穴22のピッチは約1 $\mu$ mである。

【0059】これによって、 $n$ 次と1次の回折光同士が干渉し、位相マスクの表面の凹凸周期の1/2の周期となる正弦波状の強度分布を有するピッチ0.5 $\mu$ mの干渉縞がコア層11中に生成される。その結果、光導波路効果による屈折率変化を起し、コアの屈折率が10 $^{-4}$ オーダーで増加したピッチの、0.5 $\mu$ mの2次元格子がコア層11中に形成される。

【0070】一方、発振長さ810nm付近の近赤外線レーザー光を照射した場合には、10 $^{-2}$ オーダーのより大きな屈折率の増加をコア中に起こさせることもできる。この場合には、前述の理由によって格子数を減少できるため、結果として格子サイズをおよそ10倍まで増える利点がある。

【0071】また、この場合はGeO<sub>2</sub>添加石英ガラスに代らず硫酸石英ガラス、合成石英ガラス、フッ化物ガラス、カルコナイトガラスなどほとんど全てのガラスを使用できるという大きな利点がある。

【0072】紫外光照射により屈折率変化を生じさせるためのエネルギーは、平均光電力で0.5～1W程度である。屈折率変化は干渉縞の正弦波状の光強度分布を反映するもので周期性にはならないが、コア層厚が数 $\mu$ m程度であればこの影響はほとんど無視できる。

【0073】また、ガラス光導波路3aの形成後に外部から紫外光20を照射しても、上部クラッド層12にはGeO<sub>2</sub>が添加されていないので光導波路効果による屈折率変化は生じない。

【0074】また、GeO<sub>2</sub>を添加しないガラスに近赤外線光を照射する場合は、上部クラッド層も光導波路効果による屈折率変化が生じるが、光が伝播するのはコアなのでその影響はない。

【0075】他方、単位格子サイズは屈折率の違いから従来技術と異なる。空乏ホールのない複屈折の屈折率および空乏ホールの屈折率が本発明と異なっていることから、本発明の場合には従来に比較して格子のサイズが大きくなる。

【0076】すなわち、前述のように本発明の場合には屈折率変化が小さいためにモード結合係数が小さくなり、

高反封定を得るには格子サイズを大きくすることと格子数を多くする必要がある。たとえば、光が伝播する円柱状領域でない領域（光導波路領域）の高側に格子をそれぞれ100個×100個から1000個×1000個ずつ設けられよい。その場合、格子が占有する領域がおよそ1×1mm<sup>2</sup>から100×100mm<sup>2</sup>と大きくなるが基板サイズ（直径）が1～6インチ（25.4mm～152.4mm）であることを考えると実用上全く問題がない。

【0077】このような結果から明らかなように、従来技術に比べて極めて簡単な製造プロセスによりフィルタ特性を持ったフォトニック結晶光導波路を実現することができる。

【0078】本実施形態1によれば以下の効果を得る。

【0079】（1）フォトニック結晶光導波路1の屈折率変化領域13は、スラブ光導波路3（ガラス光導波路3a）のコア層11を構成する材質と同じ材質でかつ光導波路効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されている。このため、屈折率変化領域13の深さ方向の各部の大きさは一定し、従来の空乏ホールの場合のように上下で大きさが変化しないため、ブレイグ条件をよく満たすようになり、伝播光の伝播損失あるいは波長分散が高精度に行えるようになる。したがって、たとえば、高性能な高速・分送素子として使用することができる。

【0080】（2）屈折率変化領域13は正三角形格子配列となり、充分なるブレイグ条件を満たすため、高精度な伝播の伝送損失または波長分散を低減する。

【0081】（3）フォトニック結晶光導波路1の製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域13は、電子線、SOF光、紫外線および近赤外線のものいずれかを、スラブ光導波路3の上部クラッド層12を通してコア層11に選択的に照射して光導波路効果による屈折率変化を生じさせて作製することから、高精度でまたかつ深さ方向での各部の寸法が同一な屈折率変化領域を製造することができる。

【0082】（4）フォトニック結晶光導波路1はその製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域13は、電子線、SOF光、紫外線および近赤外線のものいずれかを、スラブ光導波路3の上部クラッド層12を通してコア層11に選択的に照射して光導波路効果による屈折率変化を生じさせて作製し、従来のようなエッチング等の機械的加工を所ら必要としないため作製の極めて容易で製造コストの増大が達成できる。

【0083】（5）スラブ光導波路3aによるフォトニック結晶を作る際、特別な加工技術を要しないため大面積な低価格化、高信頼化、量産化を図ることができる。

【0084】（実施形態2）図4および図5は本発明の他の実施形態（実施形態2）であるフォトニック結晶光導波路に代わる図である。

【0085】本実施形態2はスラブ光導波路3として有機光導波路3bを使用するフォトリソ法による製造工程の一例である。

【0086】すなわち、本実施形態2が実施形態1と異なる点は、フォトリソ法によるスラブ光導波路3として、フッ素化ポリイミド等の高分子材料を用いて有機光導波路3bを形成している点で、さらに電子線、紫外線あるいはS-O-R光を外部から有機光導波路3bに照射してコアの屈折率を変化させて屈折率変化領域13を格子配列状に形成した点である。

【0087】特に、S-O-R光照射による屈折率変化はガラス光導波路に比べて約2倍大きく10°である。他の部分および動作は、前記実施形態1の場合と基本的に同じなので説明を省略する。

【0088】ただし、フォトリソ法による光導波路領域10の両端部、すなわちスラブ光導波路3の入力・出力端面は、図示しないが反射防止のために無反射コートが施されている。無反射コート膜の一例としては、ターゲット材料としてSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>を用い、それらにイオンビームを照射することによって光導波路端面に傷付を防止させて2層の無反射コーティングを施す。この方法で得られる反射率は約0.001以下である。

【0089】また、反射防止の別の手段として、入射端面に斜め研磨を施してもよい。斜め研磨の角度は光の伝播方向に垂直な方向に対して約45度以上である。この斜め研磨の代わりにダイシングソーで斜めに切断してもよい。これらの場合、S-O-R光の屈折率が得られる。

【0090】本実施形態2のフォトリソ法による製造工程について説明する。

【0091】本実施形態2では、シリコン基板2上に有機光導波路3bからなるスラブ光導波路3を形成した後、この有機光導波路3bに選択的にS-O-R (synchrotron orbital radiation)光を照射して屈折率変化領域13を格子配列状に形成してフォトリソ法による製造工程を完了する。

【0092】図示しないが、シリコン基板2上に、フッ素化ポリイミドの前駆体であるフッ素化ポリイミド膜の溶液をスピコートしてオーブン中で360°で加熱して下部クラッド10を形成する（図6参照）。

【0093】つぎに、下部クラッド層10上へ、フッ素化ポリイミド膜の溶液をスピコートしてオーブン中で360°で加熱してコア層11を形成する（図6参照）。

【0094】つぎに、前記コア層11上に、前記下部クラッド層10と同じ屈折率を持つ上部クラッド層12を前記同様な方法で形成して有機光導波路（ポリマー光導波路）3bを作製する。このとき、各層の膜厚は前記実施形態1のガラス光導波路3aの場合とほぼ同じである。

【0095】この結果、屈折率が1.53の有機光導波

路3bが得られる。

【0096】このようなスラブ光導波路3の形成方法は、半導体の結晶成長の高温プロセスと比べて温度が低く低温プロセスとなる。低温プロセスによるスラブ光導波路の作製は容易であり、製造コストの低減が図れる。

【0097】また、この方法はスピコートにより有機光導波路3bを容易に形成できるとして他の材料にない優れた特徴がある。

【0098】つぎに、有機光導波路3b上に×線を透過する屈折率変化する領域13を形成する。そのためにタンタル、タングステンあるいは金等の重金屬からなる厚さ約1μmの×線吸収体を設けた構造の×線マスクを介して後述の照射長約0.7nmのS-O-R光を、照射量102（アンペア・秒）オーダで外部から有機光導波路3bに照射する。

【0099】ガラス製造工程の場合とは異なり、格子状に穴の空いた×線マスクを透過したS-O-R光は1つ1つが円柱状の強度分布をもつスポット光となってコア層11に照射される。その結果、コア層11に10°オーダの大きな屈折率の増加した格子が形成される。

【0100】ここで、×線マスクの穴径は0.25μm、ピッチは0.5μmである。

【0101】この場合有機光導波路3bに比べて径長が極めて小さいので、製造加工が容易となり高精度をもって容易に格子をコアに書き込むことができるという優れた特徴がある。

【0102】本実施形態2では前記実施形態1が有する効果を同様に奏する。

【0103】（実施形態3）図7は本発明の他の実施形態（実施形態3）であるフォトリソ法による製造工程の平面図である。

【0104】本実施形態3では、図7に示すように、屈折率変化領域13による単位格子を正六角形格子（hexagonal lattice）状に配列してある。

【0105】正六角形格子は正六角形および正六角形に対して同じバンドギャップすなわちブラッグ反射長を有するので極めて有効である。

【0106】なお、本発明では、単位格子として前述の正六角形格子や正六角形格子以外の正多角形格子でもよい。すなわち、単位格子を正六角形格子、正八角形格子、正十二角形格子などの格子配列でもよい。また、屈折率変化領域13の形状は、格子（格子列）を構成するために少なくとも2列必要である。

【0107】（実施形態4）図8は本発明の他の実施形態（実施形態4）であるフォトリソ法による製造工程の平面図を示す模式的平面図である。

【0108】本実施形態では、フォトリソ法による光導波路領域10の両側に沿って設けられる屈折率変化領域13による格子列を複数にした例であり、かつ複数の格子列G1、G2、G3の格子間隔（ピッチ）を相



互に異なるようにした例である。これにより、通過帯域が広がるいわゆるチャープ特性を実現した例である。

【0109】特に限定はされないが、格子列G1、G2、G3のピッチを $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ とした場合、 $a_1 > a_2 > a_3$ となっている例である。

【0110】チャープピッチとは格子のピッチをある割合で連続的に変化させたときに通過帯域が広がることを言う。格子ピッチのチャープピッチは種々自由に行う。格子のピッチが場所によって不連続になるように格子を配置した正三角格子の場合について説明する。

【0111】たとえば、格子ピッチ $a$ が $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ・・・のように少しずつ小さくなるG1、G2、G3・・・の各格子領域では、各格子領域に応じてブラッグ反射波長 $\lambda_B$ が $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ ・・・のように小さく少しずつ小さくなる。この場合、連続的にはピッチが段階的に変化するのではなく格子領域で格子不整合が生じる。この不整合が生じる格子領域の間では振動がわずかなので、巨視的に見れば連続的に変化しているのと同じであると考えて問題ない。

【0112】このようにすると、ブラッグ反射波長が小さくするのでも等価的にバンドギャップが広がる。すなわち、反射帯域が広がるいわゆるチャープ特性を実現できる点がある。この効果は光ファイバで生じる波長分散の極端なことに適用することができる。ここでは、格子のピッチが連続減少する例を示したが、ピッチが無調増加する場合にも同様の効果が生ずることは言うまでもない。

【0113】本実施形態4では光透過領域5の一端にのみフォトニック結晶14を設けている。換言するならば、スラブ光透過領域5の一端に沿って屈折率変化領域15が格子配列的に配置されているとともに、前記屈折率変化領域15によるレイに対して平行にまたは垂直もしくは斜めに光が伝播する光透過領域5が設定されている。

【0114】したがって、光（入射光）を格子列に平行に伝播させることができるとともに、光の入射方向を選択することによって光の取り出し方向を種々に変えることができる。

【0115】すなわち、前記格子列に垂直に光を投入すれば、出力光は格子列で折り返して出射される。また、格子列に対して斜めに光を投入すれば、出力光は格子列で反射して所定の角度を有して出射する。したがって、角度を選べば、光の伝播方向を自由に曲げることができる。また、これらの光伝播方向の曲げの場合、その曲げ損失も小さくなる。

【0116】本実施形態4によれば光透過領域設計の自由度が高くなる。また、この構成はシリコン基板等に分割や台座する光透過領域に適用することにより、一層設計の自由度が高い。

【0117】前記領域の相互にピッチの異なる格子列は、光透過領域5の両側にそれぞれ設けてもよい。また光透過領域5の一部の長さ短く設けてもよい。

【0118】（実施形態5）図9は本発明の他の実施形態（実施形態5）であるフォトニック結晶透過領域の一部を断面とした斜視図である。

【0119】本実施形態5のフォトニック結晶透過領域1は、有機光透過領域3のみによって構成されたものである。

【0120】すなわち、フォトニック結晶透過領域1は、前記実施形態2のフォトニック結晶透過領域1において、シリコン基板2の上に形成した有機光透過領域3（スラブ光透過領域）を、酸腐蝕液を用いてシリコン基板2から剥離したものであり、使用においては支持基材で支えて使用するものである。

【0121】このようにスラブ光透過領域3を基板2から剥離すると、基板2との熱膨張係数の違いからくる応力歪みが軽減されるため屈折率による屈折率の偏屈散性が生じなくなる。したがって、本実施形態5のフォトニック結晶透過領域1は支持基材に取り付けた状態において、機械的応力や熱応力が発生しない支持形態で取り付ける必要がある。

【0122】本実施形態5のフォトニック結晶透過領域1によれば、偏屈散係数が達成できる。

【0123】以上本発明者によってなされた発明を実施形態に基づき具体的に説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能であることはいうまでもない。

【0124】たとえば、化合物半導体基板上に化合物半導体によってスラブ光透過領域を形成するとともに、屈折率変化領域を格子配列したものにしても適用できる。

【0125】たとえば、GaAs基板上にGa<sub>1-x</sub>As<sub>x</sub>によるスラブ光透過領域を形成したフォトニック結晶透過領域の場合には、0.7～0.9μmの波長帯域で使用でき、InP基板上にInGaAsP化合物半導体やあるいは、シリコン基板や石英ガラス基板等の上に石英ガラスや高分子材料を用いてスラブ光透過領域を形成したフォトニック結晶透過領域の場合は、1.0～1.5μmの長波長帯域で使用することができる。

【0126】以上の説明では主として本発明者によってなされた発明をその背景となった利用分野である光の伝送帯域の制御技術に適用した場合について説明したが、それに限定されるものではなく、たとえば、高速データ製造技術などに適用できる。

【0127】本発明は少なくとも光透過領域を有する素子、モジュール等には適用できる。

【0128】

【発明の効果】本願において開示される発明のうち代表的なものによって得られる効果を簡単に説明すれば、下記のとおりである。

【0129】(1) フォトリソグラフィによる屈折率変化領域は、スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光伝播効果による屈折率変化が施された材質で構成されている。このため、屈折率変化領域の深さ方向の各部の寸法は深さ方向の寸法をもとめて一定になることから、ブラッグ条件をよく満たすようになり、伝播光の波長制限あるいは波長透過が高精度に行えるようになる。したがって、たとえば、高性能な通信・放送素子として使用することができ、

【0130】(2) 単位格子が正六角形格子の場合、TE偏光およびTM偏光に対して同じバンドギャップとなり、伝播光の波長制限あるいは波長透過が高精度に行えるようになる。

【0131】(3) フォトリソグラフィによる屈折率変化領域の製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域は、電子線、SOL光、紫外線および遠赤外線などのいずれかを、スラブ光導波路の上層クラッド層を通してコア層に照射して光伝播効果による屈折率変化をコア層に選択的に生じさせて作製することから、高精度で寸法が広さ方向での各部の寸法が均一な屈折率変化領域を製造することができる。また、屈折率変化領域を作製するためにエッチング等の機械的加工を要しなかったため、作製が低コストで容易で製造コストの低減が達成できる。

【0132】(4) ガラス光導波路によるフォトニック結晶を作る際、特別な加工技術を要しないため大規模な設備化、高信頼化、量産化を図ることができる。

【0133】(5) スラブ光導波路を有線光導波路で構成する場合、有線光導波路は普通プロセスになるため光導波路の作製が容易になり、製造コストの低減が図れる。

【0134】(6) 有線スラブ光導波路を基板から剥がした構造のフォトニック結晶導波路では、偏波無依存化が達成できる。

【0135】(7) 光導波路の一端または両側に設けられるフォトニック結晶の複数の格子列の格子ピッチをそれぞれ異なることによってチャープング特性の実現が図れる。

【0136】(8) スラブ光導波路の一端に沿って格子列を設けた構造のフォトニック結晶導波路では、格子列に対して平行にまたは垂直もしくは斜めに光を導入させることによって、光の伝播方向を変化させることができ

る。またこの場合、光の曲げ損失も小さいという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態（実施形態1）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

【図2】本実施形態1のフォトニック結晶導波路を示す一部を断面とした斜視図である。

【図3】本実施形態1のフォトニック結晶導波路の作製において、半導体基板にスラブ光導波路を形成した状態を示す一部を断面とした斜視図である。

【図4】本実施形態1のフォトニック結晶導波路の作製において、半導体基板の表面に形成したスラブ光導波路に、コアの屈折率と異なる屈折率変化領域を格子状に配列形成する方法を示す模式的断面図である。

【図5】本発明の他の実施形態（実施形態2）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

【図6】本実施形態2のフォトニック結晶導波路を示す一部を断面とした斜視図である。

【図7】本発明の他の実施形態（実施形態3）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

【図8】本発明の他の実施形態（実施形態4）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す一部の構成図である。

【図9】本発明の他の実施形態（実施形態5）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す一部の断面とした斜視図である。

【図10】従来のフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

【図11】従来のフォトニック結晶導波路を示す一部を断面とした斜視図である。

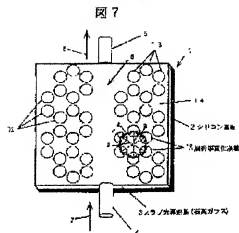
【図12】従来のフォトニック結晶導波路の作製に使用する半導体基板を示す斜視図である。

【符号の説明】

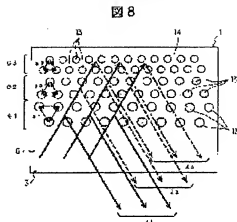
1…フォトニック結晶導波路、2…基板、3…スラブ光導波路、3a…ガラス光導波路、3b…有機光導波路、4…入力光ファイバ、5…出力光ファイバ、6…光導波路領域、7…入力光、8…出力光、9…空気ホール、10…下層クラッド層、11…コア層、12…上層クラッド層、13…屈折率変化領域、14…フォトニック結晶、20…紫外光（紫外パルス光）、21…ガラス単位格子マスク、22…穴、23…石英ガラス板。



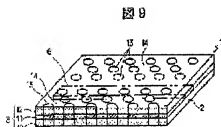
【図 7】



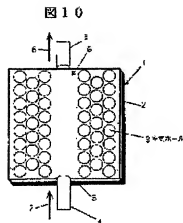
【図 8】



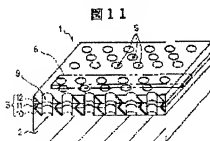
【図 9】



【図 10】



【図 11】



【圖 12】

圖 12

